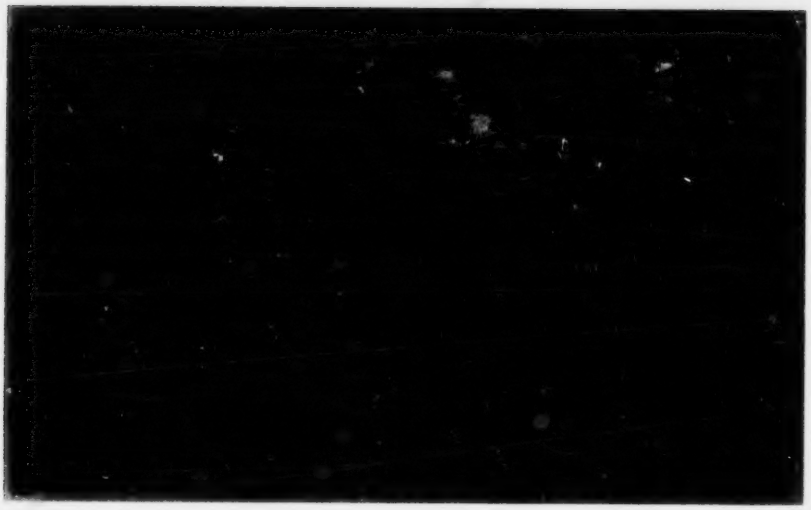
CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
(C.R.T.)
CENTRE FOR RESEARCH ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE



CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
C.P. 6128, SUCCURSALE A,
MONTRÉAL
CANADA H3C 3J7

TÉLÉPHONE: (514) 343-7575
TÉLEX: (21) 05-561325
EMAIL: crt@crt.umontreal.ca
TÉLÉCOPIEUR (FAX): (514) 343-7121

91-05306/

CRT-784

Transport et utilisation du sol : approche méthodologique du système intra-urbain[1]

par

Jean-Paul Rodrigue[2]

[1] Article préparé dans le cadre d'un mémoire de maîtrise intitulé: *"Le développement d'un modèle dynamique d'interaction spatiale et d'utilisation fonctionnelle du sol : application à Shanghai"*, déposé en janvier 1991, à la Faculté des études supérieures de l'Université de Montréal. L'auteur tient à remercier Claude Comtois pour ses commentaires et critiques.

[2] Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, succursale A, Montréal, Québec H3C 3J7 CANADA

Centre de recherche sur les transports — Publication #784

Mai 1991

Dépôt légal – 2ème trimestre 1991

Résumé: l'utilisation du sol intra-urbain représente l'état de plusieurs éléments interreliés qui forment un système spatial complexe. Ces éléments sont l'interaction, l'accessibilité, la structure de l'emploi et la population. Le modèle développé reflète ce système complexe avec un ensemble de liens entre les éléments. Chaque système intra-urbain a ses propres éléments, constantes de stabilité, indices d'impact, seuils d'activation et contraintes. Le modèle offre une nouvelle méthodologie pour représenter plusieurs systèmes intra-urbains en changeant la configuration des liens entre les éléments.

Mots clés: transport, utilisation du sol, modélisation, système intra-urbain.

Abstract: intra-urban land use represents the state of several interrelating elements that compose a complex intra-urban system. Those elements are interaction, accessibility, employment structure and population. The developed model reflects this complex system with a set of links between elements. Each intra-urban system has its own stability constants, impact indexes, activation tresholds and constraints. The model offers a new methodology to represent several urban systems by changing the configuration of links between elements.

Key words: transportation, land use, modelling, intra-urban system.

Transport et utilisation du sol:
approche méthodologique du système intra-urbain

Introduction

Une ville peut être définie par une concentration de mouvements et d'activités dans un espace donné. Ces activités sont notamment reliées à la production, aux échanges, à l'administration et à la résidence. L'utilisation du sol reflète la nature des activités et des mouvements entre différents lieux. Il y a tout de même une limite à la concentration d'activités et des mouvements dans un espace urbain qui s'apparente à la loi des rendements décroissants. Les phénomènes de décentralisation et d'étalement urbain supportent cette affirmation. Cependant, les avantages comparatifs d'un endroit varient dans le temps. Aussi, les systèmes intra-urbains sont-ils en déséquilibre permanent. Un état de déséquilibre peut se concevoir comme une évolution continuelle du système intra-urbain supporté par le fait qu'une ville ne tend jamais vers un état précis et permanent. Traditionnellement, la modélisation des transports intra-urbains a essentiellement tenter de comprendre des déséquilibres notamment ceux entre l'offre et la demande de transport et de proposer des alternatives pour résoudre des problèmes de congestions et d'optimiser le niveau d'accessibilité. Il y a beaucoup de modèles mais dans la plupart des cas peu de théories supportent ces modèles. De plus, aucun modèle n'est réellement efficace pour synthétiser et prévoir les impacts de changements économiques et démographiques sur le système intra-urbain. La plupart des modèles sont statiques, déterministes et requérant trop de données pour être applicables dans un contexte réel, ou encore, sont limités à un secteur spécifique comme le logement (Berechman and Small, 1988). Quelques modèles tels les nouveaux modèles économiques (Richardson, 1977) utilisent des suppositions qui ont peu de solidité théorique. White (1989) maintient que d'écrire un ensemble d'équations pour décrire la dynamique urbaine ne révèle rien sur les relations structurelles que ces équations modélisent. En d'autres mots, des équations qui sont appropriées pour une période historique ne sont pas nécessairement applicables à une autre. Même des équations développées pour un système urbain spécifique sont souvent inapplicables à un autre système urbain. Nombre de modèles adaptent les théories urbaines empiriques aux mathématiques au lieu d'adapter les mathématiques aux processus urbains. Openshaw (1986,1989) démontre que la plupart des modèles se basent sur des théories qui sont rarement appliqués aux études urbaines ou à la planification de réseaux de transport. Il existe une dualité entre la théorie et l'application, mais il y a une tendance pour intégrer des concepts théoriques de l'utilisation du sol à la planification de réseaux de transport (Pryor, 1987). Sur ce point de vue, Berechman et Small (1988) démontrent que la dynamique, le hasard et les économies d'agglomération jouent un rôle clé dans la modélisation de la structure urbaine. Le concept de hasard doit se concevoir comme l'ensemble des processus urbains qui échappent à la compréhension, au contrôle et aux prévisions du planificateur. Pumain, Sanders et Saint-Julien (1984) démontrent que la structure urbaine et son évolution ne doivent pas être considérées comme donné, mais comme le résultat d'interactions complexes. C'est précisément

sur ces aspects que la plupart des modèles opérationnels d'utilisation du sol sont déficients. Pour pallier à ces déficiences, Berechman et Small (1988) proposent trois points: premièrement, ajouter des éléments d'économies d'agglomération et des ajustements dynamiques à un modèle existant (comme celui de Lowry); deuxièmement, ajouter plus de réalisme et de détails à un modèle dynamique d'économie d'agglomération; troisièmement, créer un nouveau modèle.

Cet article tentera de créer un nouveau modèle dans le domaine des transports et de l'utilisation du sol (Webster, Bly and Paulley, 1988) qui vise à vérifier l'hypothèse selon laquelle un système intra-urbain est un ensemble complexe de liens entre les éléments qui le compose. Une nouvelle méthodologie en géographie des transports basée sur un modèle adaptable à n'importe quelle ville sera développée. Des développements récents en intelligence artificielle ont donné aux géographes de nouveaux outils pour simuler la dynamique de systèmes urbains complexes (White, 1989). Pour atteindre l'objectif de représentation de l'évolution d'un système intra-urbain, le modèle doit être en mesure de transformer les relations entre ses éléments, c'est-à-dire changer la valeur de leurs liens.

La plupart des modèles cherchent un niveau optimal pour augmenter le niveau fonctionnel d'un système intra-urbain. Mais, est-il nécessaire de rechercher un niveau optimal pour atteindre un niveau fonctionnel? Cette question a tout son sens car chaque ville du monde est un système intra-urbain complexe avec des contraintes multiples où un niveau optimal ne peut se concevoir. Un système intra-urbain fonctionnel est un système où les problèmes de transport causent peu de déséconomies d'agglomération. Ceci est un élément fondamental de la problématique de la planification urbaine. Les villes offrent aux planificateurs un ensemble d'alternatives possibles, mais aucun optimal unique. Aucune ville ne peut se permettre toutes les transformations structurelles de son espace qui requérait une recherche de l'optimal. Ces points soulignent que l'optimisation n'est pas nécessaire pour atteindre un niveau fonctionnel. La méthodologie du modèle développé considère ce concept.

Cet article présentera d'abord les mécanismes des changements d'utilisation du sol. Il s'agit d'identifier les liens probants entre les concepts qui identifient l'utilisation du sol. Par la suite la logique mathématique du modèle sera abordée. Cette démarche consiste à établir une représentation mathématique des liens entre les concepts qui identifient l'utilisation du sol.

Mécanismes des changements d'utilisation du sol

Par définition, l'élaboration d'un mécanisme est un processus pour établir les interrelations entre plusieurs concepts qui contrôlent ce mécanisme. Dans le modèle proposé, les mécanismes sont ceux relatifs aux changements d'utilisation du sol. Un changement d'une ou plusieurs composantes produira un changement de toutes les composantes du modèle si un changement minimal définit par seuil d'activation est atteint. Ceci implique qu'un système urbain qui n'est pas suffisamment affecté n'aura pas de changements significatifs dans le volume et la distribution spatiale de ses activités. La connaissance de l'histoire de l'urbanisation d'un système

est importante pour comprendre l'état actuel de ce système et pour faire des prévisions. L'utilisation du sol est le résultat de ces processus historiques et représente le niveau d'accumulation dans un espace donné des mouvements, des infrastructures de transport, des activités économiques et de la population. Un système urbain ne peut garder une situation de stabilité pour une longue période de temps à cause de changements de facteurs dynamiques internes comme le vieillissement des infrastructures de transport ou des changements dans la composition démographique. Cette particularité souligne qu'il est préférable de parler de stabilité au lieu d'équilibre dans le cas de la modélisation d'un système urbain. La perte de stabilité du système intra-urbain s'intègre dans le contexte de facteurs externes comme la position de la ville dans le système urbain régional, national et international. Quelques uns des facteurs externes les plus puissants sont la création de blocs économiques, la division internationale du travail et la mondialisation des échanges qui affectent la localisation d'un grand nombre d'activités intra-urbaines. Le résultat est un système intra-urbain en restructuration ou en déstructuration et des changements d'utilisation du sol. Conséquemment, il est important d'évaluer les mécanismes théoriques qui contrôlent les changements d'utilisation du sol par l'élaboration des liens logiques entre les éléments du modèle et par une modélisation de ces liens.

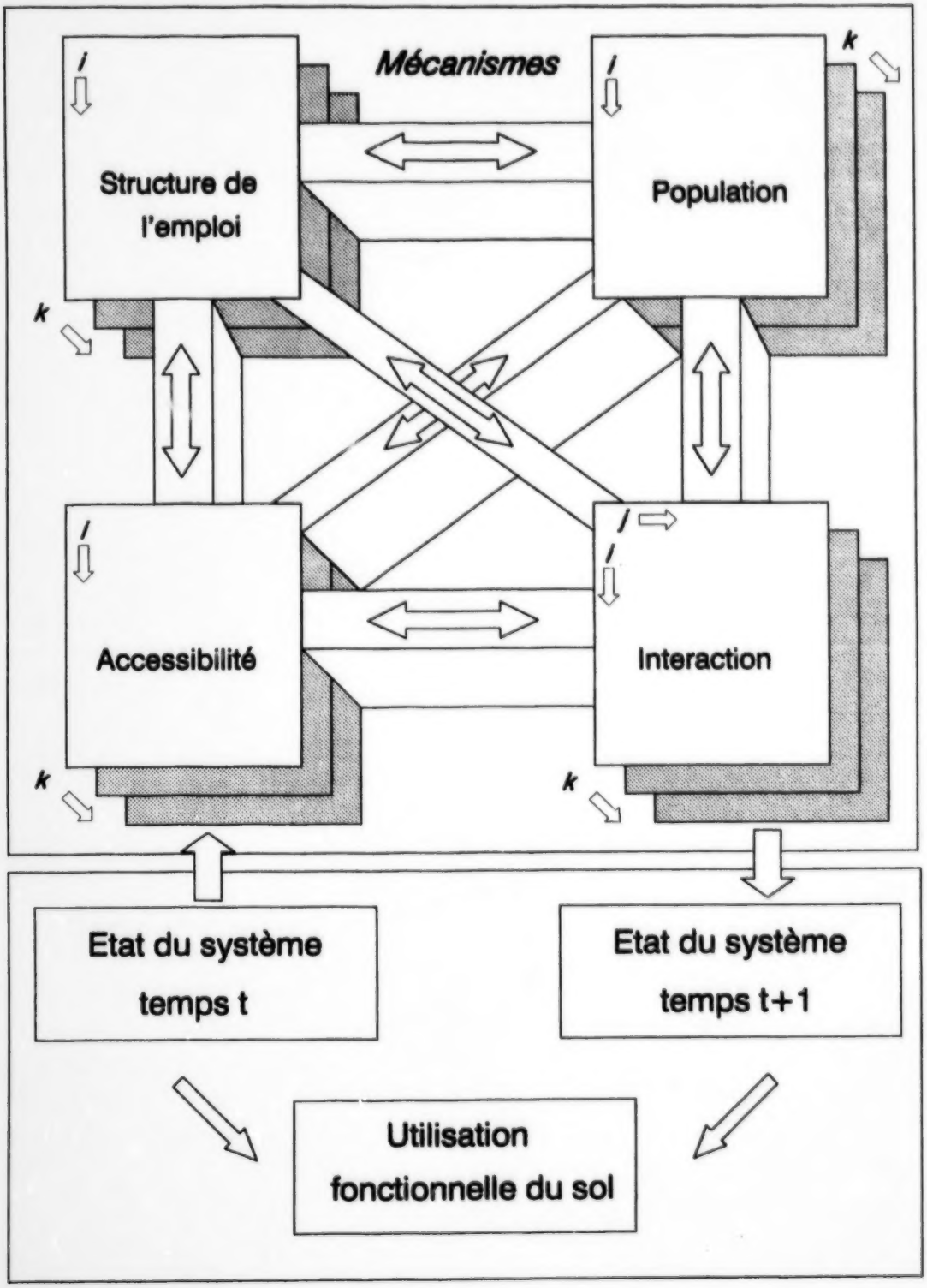
La logique du modèle se base sur les processus fonctionnels entre les composantes du modèle (éléments). La figure 1 propose une structure relationnelle pour conceptualiser les mécanismes théoriques des changements d'utilisation du sol. Le modèle se base sur le principe qu'un système intra-urbain passe d'un état (temps t) à un autre (temps t+1). Ce modèle s'adapte en fonction de la désagrégation spatiale disponible. Chaque élément modal (interaction), infrastructurel (accessibilité), économique (structure de l'emploi) et démographique (population) possède un exposant k qui indique une catégorie et un indice i qui indique un endroit du système S. La figure 1 montre les liens théoriques suivants entre chacun des éléments qui compose le système intra-urbain:

1) Accessibilité / structure de l'emploi: la présence d'infrastructures du transport donne un niveau d'accessibilité qui détermine la nature de la structure de l'emploi. Les endroits accessibles ont généralement une structure de l'emploi importante et diversifiée. La nature économique d'un endroit va influencer la complexité des infrastructures de transport et donc son niveau d'accessibilité.

2) Accessibilité / interaction: plus une zone est accessible et offre un potentiel de mouvements (offre en transport élevée), plus les mouvements entre les zones utiliseront cette zone comme un axe de mouvement vers une autre zone. Inversement, l'intensité des interactions détermine le niveau d'utilisation du réseau de transport. Un niveau d'utilisation plus élevé que la capacité des infrastructures de transport crée une congestion qui diminue le niveau d'accessibilité. Il y a une forte rétroaction qui influence le système jusqu'à ce qu'un niveau temporaire de stabilité soit atteint. Les changements d'accessibilité ont souvent un impact immédiat sur l'interaction spatiale.

3) Accessibilité / population: l'accessibilité influence la localisation de la population par le fait que cette population recherche des possibilités de mouvements entre différentes zones urbaines. L'accessibilité à certains

Structure relationnelle du modèle Figure 1



modes ou à certains endroits intermodaux comme l'accessibilité portuaire est moins importante dans la localisation de la population. Ce type d'accessibilité influence tout de même la localisation de la population par son importance pour certaines activités qui génèrent de l'emploi. La présence de population est un facteur incitatif pour la construction d'infrastructures de transport telles le transport en commun.

4) Structure de l'emploi / interaction: la présence d'une activité dans un système intra-urbain génère des mouvements de personnes, de biens et d'informations. La nature des activités urbaines est très diversifiée, donc les interactions seront très diversifiées. Un changement de la structure de l'emploi influence l'intensité de interactions qui entrent ou qui originent de cet endroit. La distribution spatiale, le volume et la nature des interactions influence la structure de l'emploi sur deux points; premièrement, les interactions se font sur des modes de transport; deuxièmement, la présence d'interactions d'une zone à une autre créer des activités de service liées à ces mouvements.

5) Structure de l'emploi / population: la structure de l'emploi a un impact direct sur la distribution spatiale et le volume de la population. Des changements dans la structure de l'emploi affectent l'offre de main d'oeuvre et souvent la distribution de la population. Inversement, la population d'une zone influence la structure de l'emploi par la demande de biens et services. L'offre de main d'oeuvre d'une population est un facteur pour l'établissement d'activités économiques.

6) Interaction / population: la population d'une zone influence les interactions de personnes, de biens et d'informations. Un changement dans la distribution et le volume de la population urbaine entraîne dans changements dans la nature, la distribution et le volume des interactions, particulièrement celles reliées aux mouvements des personnes.

7) L'utilisation fonctionnelle du sol représente l'état du système intra-urbain au temps t. Ses éléments sont l'interaction (T^k_{St}), l'accessibilité (A^k_{St}), la structure de l'emploi (S^k_{St}) et la population (P_{St}). Donc, l'utilisation fonctionnelle du sol pour un système S au temps t (U_{St}) peut se définir par l'ensemble de ses éléments:

$$U_{St} \supset \left\{ T^k_{St} \, , \, A^k_{St} \, , \, S^k_{St} \, , \, P_{St} \right\} \qquad (1)$$

L'utilisation fonctionnelle du sol du système est représenté par le niveau des variables. Si les éléments du modèle et leurs liens sont appliqués à l'utilisation fonctionnelle du sol, cette dernière peut se comprendre en tant que processus dynamique. La section suivante modélise ce processus.

Logique mathématique du modèle

Le premier élément conceptuel du modèle est relié à l'état du système intra-urbain, c'est-à-dire son utilisation fonctionnelle du sol. Prenons U_{St} pour identifier l'état du système S au temps t et E_{St}^n le n ième élément pour le même système au même temps. Il advient que:

$$U_{S_t} \supset \left\{ E^n_{S_t} \; \forall \; n \right\} \tag{2}$$

est une version simplifiée de l'équation 1. Il est important de souligner que chaque élément est composé de sa valeur et de son champ d'erreur. Le champ d'erreur ($e_{S_t}{}^X$) est l'intervalle numérique de l'erreur associée à l'élément E^X. Alors, les éléments (E^X,E^Y,...,E^n) pour le système S au temps t sont définis par:

$$E^X_{S_t} = E^X_{S_t} \pm e^X_{S_t}, \; E^Y_{S_t} = E^Y_{S_t} \pm e^Y_{S_t}, \; \ldots \; , \; E^n_{S_t} = E^n_{S_t} \pm e^n_{S_t} \tag{3}$$

Initialement, e est l'erreur reliée aux données. La notion de champ d'erreur peut être incorporée à une logique beaucoup plus complète, l'ensemble flou (Negotia and Ralescu, 1987; Yager and al, 1987; Zadeth, 1965). Un ensemble flou est une méthode pour déterminer l'appartenance d'un élément à un ensemble. Dans les mathématiques classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. Si $x \in A$, alors x a une valeur d'appartenance de 1 à l'ensemble A. Inversement, si $x \notin A$, alors la valeur d'appartenance de x à l'ensemble A sera 0. Dans la théorie des ensembles flous, cette dichotomie est remplacée par une fonction d'appartenance. Si u(A) dénote une fonction d'appartenance d'un élément à un ensemble A, alors cette fonction est délimitée par $0 \leq u(A) \leq 1$. Une variable appartient plus un moins à un ensemble. La valeur d'appartenance d'une variable (P(A)) s'exprime par:

$$P(A) = (u \mid u(A) \rightarrow [0,1]) \tag{4}$$

où u est le champ d'appartenance. Si nous incorporons la notion du champ d'erreur à celle du champ flou, il advient que u = e. La valeur d'appartenance de l'élément E^X à son ensemble sur formule par:

$$P\left(E^X_{S_t}\right) = \left(e^X_{S_t} \mid u\left(E^X_{S_t}\right) \rightarrow [0,1]\right) \tag{5}$$

où $u(E_{S_t}{}^X)$ est la fonction d'appartenance de l'élément E^X à son propre ensemble. La fonction d'appartenance de l'élément E^X est délimitée par son champs d'erreur e^X. Il est probable que la fonction d'appartenance prenne la forme d'une courbe normale ou de toute distribution relativement similaire. La médiane de cette distribution est la valeur la plus probable (appartenance maximale) de l'élément E^X à son propre ensemble. Un système a une concentration fonctionnelle maximale d'éléments tels l'interaction, l'accessibilité, la structure de l'emploi et la population. Donc, les éléments (E^X, E^Y, ..., E^n) pour le système S au temps t peuvent être soumis aux contraintes suivantes:

$$E_{St}^{X} \leq C_{St}^{X}$$
$$E_{St}^{Y} \leq C_{St}^{Y} \qquad (6)$$
$$\ldots$$
$$E_{St}^{n} \leq C_{St}^{n}$$

où: C_{St}^{X} = valeur fonctionnelle maximale pour l'élément E^X.
C_{St}^{Y} = valeur fonctionnelle maximale pour l'élément E^Y.
C_{St}^{n} = valeur fonctionnelle maximale pour l'élément E^n.

Maintenant que les éléments du système intra-urbain sont définis, nous supposons qu'un élément E^X influence un élément E^Y. Pour illustrer cette influence dans le temps, nous proposons un indice d'impact $I_{St,t}^{XY}$ qui s'exprime par:

$$I_{St,t}^{XY} = f(E^X, E^Y)_{St} \qquad (7)$$

Les indices d'impact ont aussi un champ d'erreur ($e_{St,t}^{I}$) qui prend la forme de:

$$e_{St,t}^{I} = f(e^X, e^Y)_{St} \qquad (8)$$

L'indice d'impact est fonction de l'influence de l'élément E^X sur l'élément E^Y pour une période dans le temps comprise entre t et t+1. Il est important de souligner l'importance de la notion de délais, parce que tout changement n'a pas un impact immédiat sur l'utilisation du sol intra-urbain. Pour des raisons de simplicité, le temps t+1 est le moment où E^X a exercé son impact sur E^Y. Un indice d'impact peut prendre une infinité de valeurs. Nous supposons que sa valeur est dans la plupart des cas située entre -1 et 1. Un indice d'impact qui prend une valeur négative signifie qu'un élément fait varier l'autre de façon inversement proportionnelle. Un indice d'impact de 0 indique qu'il n'y a aucun impact de l'élément E^X sur l'élément E^Y. Un indice d'impact positif signifie qu'un élément fait varier l'autre de façon proportionnelle.

Lorsque la valeur d'un élément E^X est plus élevée que sa contrainte (valeur fonctionnelle maximale), il y a bifurcation de la fonction de l'indice d'impact de E^X sur E^Y. Avant cette bifurcation, il y a des économies d'agglomération et l'indice d'impact de E^X sur E^Y est positif. Après cette bifurcation, il y a des déséconomies d'agglomération et l'indice d'impact est négatif (voir figure 2). Ceci est un simple adaptation de la théorie des catastrophes et bifurcations (Wilson, 1981). Par exemple, trop d'interactions modales à un endroit entrainent des congestions du réseau de transport qui font baisser le niveau d'accessibilité modale de cet endroit. Dans certains cas, la valeur fonctionnelle maximale d'un élément E^X (C_{St}^{X}) est inconnue. Dans ce cas, il faut déterminer pour une fonction $f(E^X, E^Y)_{St}$ quand l'indice d'impact est négatif, positif ou neutre. Ce seuil peut être une projection de l'indice d'impact observé dans le temps (Coutrot et Droesbeke, 1984), ou une estimation empirique.

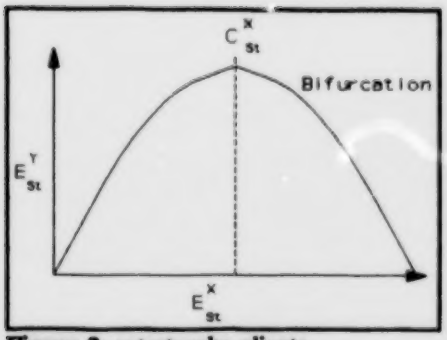


Figure 2: catastrophe pliante

Le principe pour intégrer de notions d'économies et de déséconomies d'agglomération au modèle est de donner un signe à l'indice d'impact:

$$\begin{aligned} &\forall\, E^{X}_{St+1} < C^{X}_{St+1} \;\exists\; 0 < I^{XY}_{S\Delta t} < \infty \\ &\forall\, E^{X}_{St+1} > C^{X}_{St+1} \;\exists\; 0 > I^{XY}_{S\Delta t} > -\infty \\ &\forall\, E^{X}_{St+1} = C^{X}_{St+1} \;\exists\; I^{XY}_{S\Delta t} = 0 \end{aligned} \qquad (9)$$

Cette équation exprime un certain nombre de règles: 1) Pour tout élément E^X pour le système S au temps t+1 qui est plus petit que sa contrainte fonctionnelle pour le même temps, il existe un indice d'impact entre t et t+1; 2) Pour tout élément E^X pour le système S au temps t+1 qui est plus grand que sa contrainte fonctionnelle pour le même temps, il existe un indice d'impact négatif entre t et t+1; 3) pour tout élément E^X pour le système S au temps t+1 qui est égal à sa contrainte fonctionnelle pour le même temps, il existe un indice d'impact de 0 entre le temps t et t+1.

La plupart des modèles considèrent qu'une faible augmentation d'un élément fait varier légèrement les autres éléments qui sont en relation avec cet élément. Ce postulat est erroné si nous considérons la logique des changements d'utilisation du sol. Un faible changement d'une composante spatiale d'un système intra-urbain a généralement peu ou pas d'impact sur les autres composantes spatiales et donc sur l'utilisation du sol. Même un changement important peut avoir très peu d'impacts. Dans les deux cas, le seuil d'activation déterminera si l'indice d'impact prend ou ne prend pas une valeur de 0. Le seuil d'activation ($A_{S\Delta t}{}^{XY}$) d'une interrelation des éléments E^X et E^Y pour une période entre t et t+1 s'exprime par:

$$Si\ \frac{dE^{X}_{S}}{dt} \leq A^{XY}_{S\Delta t} \therefore I^{XY}_{S\Delta t} = 0 \qquad (10)$$

Des changements dans la technologie de production font que des changements dans la structure de l'emploi n'auront pas les mêmes impacts dans le temps et l'espace sur la demande de main d'oeuvre et la distribution spatiale de la population. Considérant cet exemple, la notion de variation temporelle de l'indice

d'impact est introduite:

$$I_{S\Delta t}^{XY} = f(E^X, E^Y)_{St} = I_{S\Delta t'}^{XY} + \frac{dI_S^{XY}}{dt} \qquad (11)$$

où: $I_{S\Delta t}^{XY}$ = indice d'impact pour une interrelation entre les éléments E^X et E^Y pour le système S pour une période antérieure dans le temps.
dI_S^{XY}/dt = variation de l'indice d'impact dans le temps pour une interrelation entre les éléments E^X et E^Y.

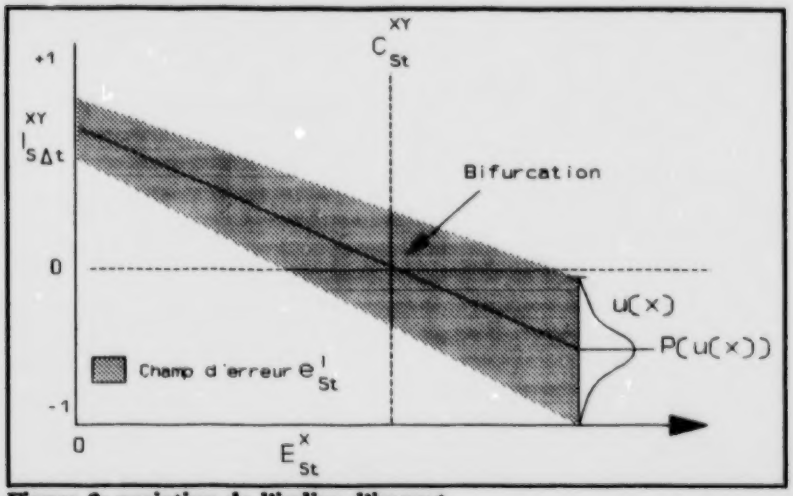


Figure 3: variation de l'indice d'impact

La figure 3 résume une variation linéaire d'un indice d'impact en fonction d'une variation temporelle de l'élément E^X. Le symbole P(u(x)) indique la valeur d'appartenance de l'indice d'impact à son ensemble flou délimiter par son champs d'erreur (e^I). Cette valeur d'appartenance est définie par une fonction u(x). Il y a une bifurcation de la fonction (E^X sur I^{XY}) au point C^{XY} qui est la valeur fonctionnelle maximale que l'élément E^X peut avoir. Ceci signifie qu'à un moment dans le temps, il n'y a pas d'impact de E^X sur E^Y parce que la fonction de l'indice d'impact a atteint la contrainte fonctionnelle maximale (croisement des axes 0 et C_{St}^{XY} sur la figure 3). Il y a une croissance linéaire du champ d'erreur dans le temps.

Le modèle est essentiellement basé sur l'évaluation des variations temporelles et spatiales de l'indice d'impact. Les variations temporelles des indices d'impact entre les éléments suivantes peuvent être avancées:
1) Accessibilité / structure de l'emploi: des changements d'accessibilité subséquents n'auront pas les mêmes effets sur la structure de l'emploi. A titre d'exemple, l'implantation d'infrastructures de transport supplémentaires n'aura pas les mêmes impacts sur la structure de l'emploi que la construction des infrastructures initiales.
2) Accessibilité / interaction: les processus d'impact de l'accessibilité sur l'interaction ne seront pas les mêmes dans le temps. Ainsi, l'implantation d'une accessibilité routière n'aura pas les mêmes impacts qu'une

augmentation de la capacité des infrastructures existantes.

3) Accessibilité / population: une variation de l'accessibilité n'aura pas les mêmes impacts dans le temps sur les variables démographiques. Lorsqu'une population a un niveau d'accessibilité pour certaines infrastructures (comme le transport public), un changement démographique ne changera pas l'accessibilité comme il l'aurait fait initialement. Les effets d'un changement d'accessibilité sur un quartier résidentiel ont des impacts sur une longue période de temps (Wegener, 1987).

4) Structure de l'emploi / interaction: des changements dans la technologie de production causent des changements dans le temps sur la demande de main d'oeuvre et de matières premières. L'industrie textile moderne par exemple nécessite moins de main d'oeuvre pour une productivité accrue. Donc, une structure de l'emploi ne générera pas les mêmes interactions dans le temps.

5) Structure de l'emploi / population: une structure de l'emploi n'a pas les mêmes besoins de main d'oeuvre dans le temps. La technologie moderne baisse la demande de main d'oeuvre dans un secteur tandis qu'elle l'augmente dans un autre.

6) Interaction / population: la croissance de la mobilité créer un niveau d'interaction spatiale plus élevé pour une population constante. Des changements dans la structure démographique influent sur les interactions de personnes.

Pour refléter la situation d'un système intra-urbain au temps t, une constante de stabilité qui exprime une relation entre deux éléments est proposée. Chacune des interrelations entre les éléments est caractérisée par une constante de stabilité définie par:

$$K_{St}^{XY} = \frac{E_{St}^{X}}{E_{St}^{Y}} \qquad (12)$$

où: K_{St}^{XY} = constante de stabilité pour une interrelation pour le système S au temps t.
E_{St}^{X} = élément nominal d'une interrelation pour le système S au temps t.
E_{St}^{Y} = dénominateur d'une interrelation pour le système S au temps t.

La figure 4 montre les constantes de stabilité entre chacun des éléments de type k au lieu i au temps t. La figure 5 présente la configuration des constantes de stabilité dans un simple système de 10 éléments. Pour un nombre d'éléments disponibles pour un système intra-urbain (n), il y a n(n-1) possibilités de constantes de stabilité. Cependant, le nombre réel de constantes de stabilité est moins élevé que le nombre maximal. Par exemple, une constante de stabilité entre l'accessibilité portuaire et l'emploi financier est très improbable. Ceci explique pourquoi le nombre de constantes de stabilité est inférieur à 90 sur la figure 5.

L'objectif du modèle est de prévoir de nouvelles valeurs pour les éléments, donc un nouvel état du système intra-urbain pour le temps t+1. Ceci implique des changements des constantes de stabilité. Les changements des constantes de stabilité reposent sur de nouvelles conditions qui affectent le système intra-urbain et qui lui fait perdre sa stabilité initiale. Pour atteindre une nouvelle stabilité dans le temps, nous considérons

Figure 4
Structure relationnelle des constantes de stabilité

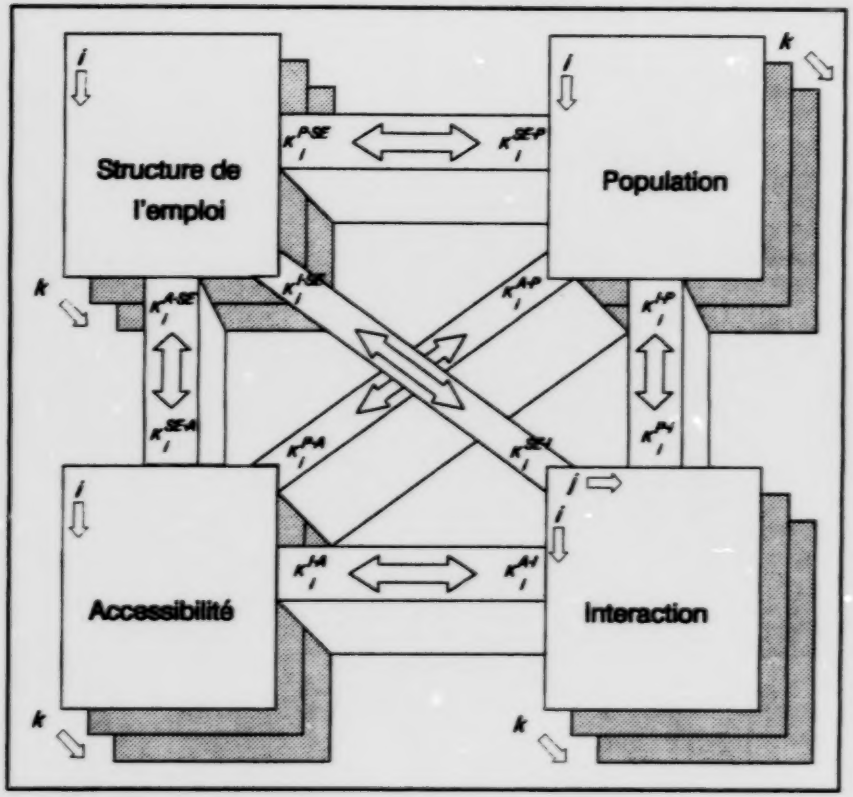
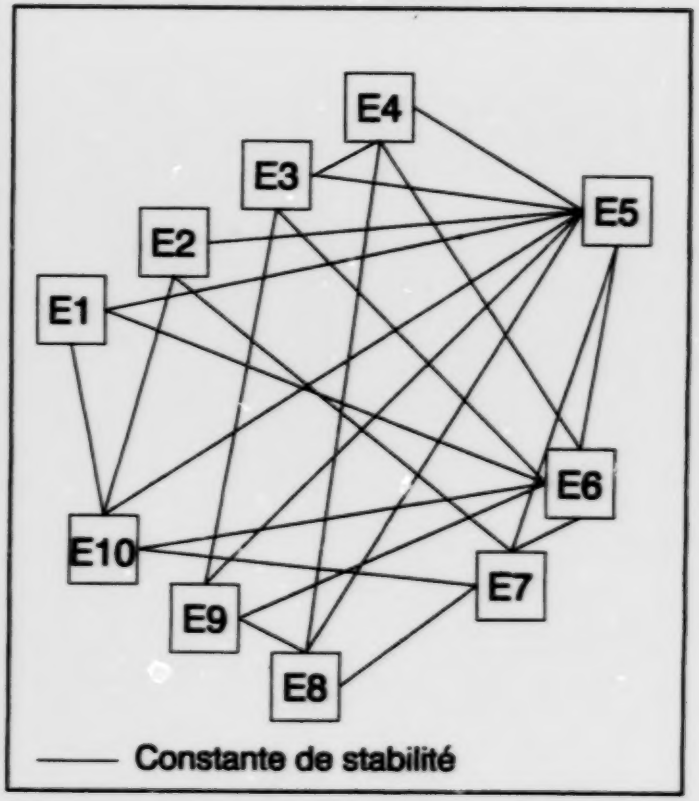


Figure 5
Configuration des constantes



qu'une constante de stabilité K_s^{XY} au temps t+1 est définie par:

$$K_{S_{t+1}}^{XY} = \frac{E_{S_{t+1}}^{X}}{E_{S_{t+1}}^{Y}} \tag{13}$$

où: $E^X_{S_{t+1}}$ = changement connu ou estimé de l'élément E^X pour le temps t+1.
$E^Y_{S_{t+1}}$ = élément a être estimé par un changement de l'élément E^X au temps t+1.

Ce changement peut être un stimulus (un changement observé pour le système), le résultat d'un modèle (un changement calculé pour le système) ou une condition exploratoire (une théorie de planification) soumis au système intra-urbain à un temps initial pour obtenir un résultat au temps t+1. Ce changement peut être de deux ordres conceptuels (endogène ou exogène au système intra-urbain) et de deux ordres spatiaux (l'ensemble du système ou une partie de ses éléments spatiaux). La valeur à estimer au temps t+1 (E^Y_s, dénominateur) pour une interrelation est définie par:

$$E_{S_{t+1}}^{Y} = E_{S_t}^{Y} + \frac{dE_S^Y}{dt} \tag{14}$$

où dE_s^Y/dt est la variation du dénominateur E^Y dans le temps. Cette variation s'exprime par:

$$\frac{dE_S^Y}{dt} = \sum_{X \neq Y} \left(\frac{dE_S^X}{K_{S_t}^{XY}\, dt}\, I_{S\Delta t}^{XY} \right) \tag{15}$$

où: $I_{S\Delta t}^{XY}$ = indice d'impact de l'élément nominal E^X sur l'élément E^Y entre le temps t et t+1.
dE_s^X/dt = changement de l'élément nominal E^X entre le temps t et t+1.
$K_{S_t}^{XY}$ = constante de stabilité entre les éléments E^X et E^Y au temps t.

La valeur de l'élément E^Y au temps t+1 sera déterminée par sa valeur initiale à laquelle on ajoute l'impact qui produira le changement connu ou estimé de l'élément E^X sur E^Y. Dans le modèle proposé, le dénominateur E^Y au temps t+1 peut devenir l'élément nominal E^X au temps t+1 d'une interrelation avec un autre dénominateur qui servira à calculer un autre élément E^Y. Par exemple, une augmentation de l'interaction peut faire baisser l'accessibilité d'un lieu qui peut influencer la structure de l'emploi, qui elle même peut exercer une rétroaction sur l'interaction. Ces relations s'effectuent sur une période de temps allant de t à t+1, où t+1 peut représenter le temps où le système a atteint une nouvelle phase de stabilité. Les équations 14 et 15 s'intègrent pour donner:

$$E_{S_{t+1}}^{Y} = E_{S_t}^{Y} + \sum_{X \neq Y} \left(\frac{dE_S^X}{K_{S_t}^{XY}\, dt}\, I_{S\Delta t}^{XY} \right) \tag{16}$$

Dans le but de rendre le modèle opérationnel, il importe d'effectuer une désagrégation spatiale. Le modèle développé jusqu'ici analyse un système intra-urbain S dans son ensemble. La justesse de la désagrégation

spatiale déterminera le degré de prévision du modèle à plus grande échelle, soit au niveau des éléments spatiaux du système. Comme l'indique la figure 6, une configuration intra-zonale des éléments du modèle peut être intégrée à une configuration inter-zonale. Ceci implique l'élaboration de constantes de stabilité entre les éléments d'une zone 1 (E_1^X) et les éléments des zones 1 à n (E_n^X). Un élément E^X au lieu i a un impact sur un élément E^Y au même endroit et aux lieux {j,k,...,n}. L'interface entre les éléments se conçoit en tant que processus dynamique complexe. Cette approche crée toutefois un nombre important d'interrelations qui génèrent une représentation fort complexe du système intra-urbain.

L'étape finale de l'élaboration du modèle de transport et d'utilisation fonctionnelle du sol consiste à transcrire de façon mathématique la figure 4 considérant une désagrégation spatiale du système S. Alors, nous avons les relations suivantes:

$$\begin{aligned} S_{St} &= f\left\{ \sum_{\forall i} P_{it} \cdot \sum_{\forall i} A_{it} \cdot \sum_{\forall i} T_{it} \right\} \\ P_{St} &= f\left\{ \sum_{\forall i} S_{it} \cdot \sum_{\forall i} A_{it} \cdot \sum_{\forall i} T_{it} \right\} \\ A_{St} &= f\left\{ \sum_{\forall i} P_{it} \cdot \sum_{\forall i} S_{it} \cdot \sum_{\forall i} T_{it} \right\} \\ T_{St} &= f\left\{ \sum_{\forall i} P_{it} \cdot \sum_{\forall i} S_{it} \cdot \sum_{\forall i} A_{it} \right\} \end{aligned} \qquad (17)$$

où:
T_{it} = interaction pour le lieu i au temps t.
A_{it} = accessibilité pour le lieu i au temps t.
S_{it} = structure de l'emploi pour le lieu i au temps t.
P_{it} = population pour le lieu i au temps t.

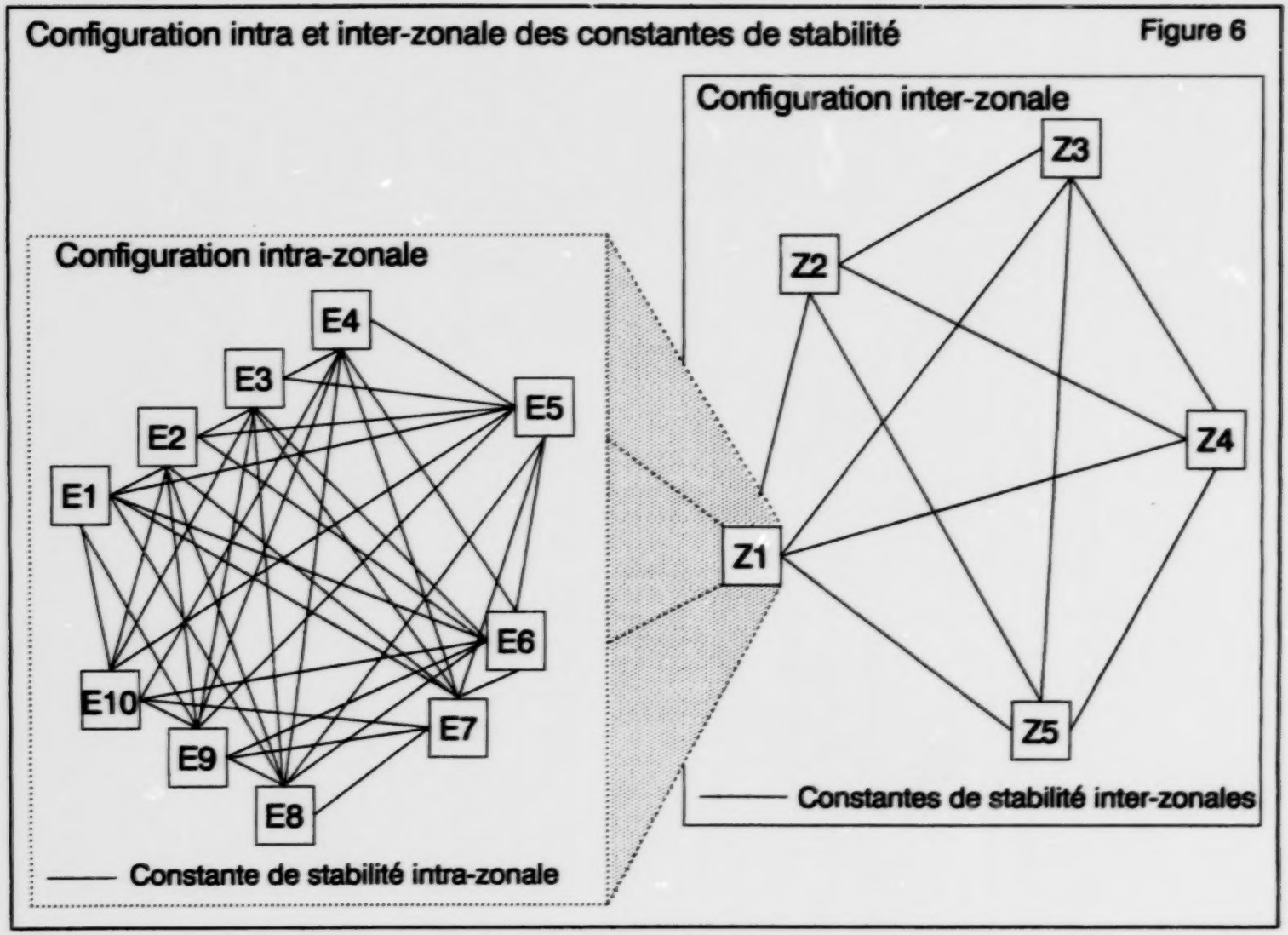
Pour le temps t+1 cette équation devient:

$$\begin{aligned} S_{St+1} &= f\left\{ \sum_{\forall i} P_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} A_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} T_{it+1} \right\} \\ P_{St+1} &= f\left\{ \sum_{\forall i} S_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} A_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} T_{it+1} \right\} \\ A_{St+1} &= f\left\{ \sum_{\forall i} P_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} S_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} T_{it+1} \right\} \\ T_{St+1} &= f\left\{ \sum_{\forall i} P_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} S_{it+1} \cdot \sum_{\forall i} A_{it+1} \right\} \end{aligned} \qquad (18)$$

et où:

$$U_{St+1} \supseteq \left\{ T_{St+1} \cdot A_{St+1} \cdot S_{St+1} \cdot P_{St+1} \right\} \qquad (19)$$

Alors, l'utilisation du sol au temps t+1 du système S (U_{St+1}) est l'ensemble des éléments au temps t+1. En intégrant le modèle développé à cette équation, nous avons:


Configuration intra et inter-zonale des constantes de stabilité
Figure 6
Configuration inter-zonale
Z3
Z2
Z4
Z1
Z5
Constantes de stabilité inter-zonales
Configuration intra-zonale
E4
E3
E5
E2
E1
E6
E10
E7
E9
E8
Constante de stabilité intra-zonale

$$U_{S_{t+1}} \supset \left\{ \left(\sum_{\forall i} E^{n}_{i_{t+1}} = \sum_{\forall i} E^{n}_{i_t} + \sum_{\forall m \neq n} \sum_{\forall j} \left(\frac{dE^{m}_{i}}{K^{mn}_{ji_t}\, dt}\, I^{mn}_{ji\Delta t} \right) \right) \forall\, n \right\} \tag{20}$$

Cette équation peut être simplifiée pour devenir:

$$E^{n}_{S_{t+1}} = \sum_{\forall i} E^{n}_{i_t} + \sum_{\forall m \neq n} \sum_{\forall j} \left(\frac{dE^{m}_{i}}{K^{mn}_{ji_t}\, dt}\, I^{mn}_{ji\Delta t} \right) \tag{21}$$

ou encore si le système S est considéré dans son ensemble:

$$E^{n}_{S_{t+1}} = E^{n}_{S_t} + \sum_{\forall m \neq n} \left(\frac{dE^{m}_{S}}{K^{mn}_{S_t}\, dt}\, I^{mn}_{S\Delta t} \right) \tag{22}$$

Ce qui est similaire à l'équation 16. Considérant les éléments de l'équation 18, l'équation 22 se résout par:

$$\begin{aligned}
S_{S_{t+1}} &= S_{S_t} + \left(\frac{dS_S}{dt} = \frac{dP_S}{K^{PS}_{S_t}\, dt}\, I^{PS}_{S\Delta t} + \frac{dA_S}{K^{AS}_{S_t}\, dt}\, I^{AS}_{S\Delta t} + \frac{dT_S}{K^{TS}_{S_t}\, dt}\, I^{TS}_{S\Delta t} \right) \\
P_{S_{t+1}} &= P_{S_t} + \left(\frac{dP_S}{dt} = \frac{dS_S}{K^{SP}_{S_t}\, dt}\, I^{SP}_{S\Delta t} + \frac{dA_S}{K^{AP}_{S_t}\, dt}\, I^{AP}_{S\Delta t} + \frac{dT_S}{K^{TP}_{S_t}\, dt}\, I^{TP}_{S\Delta t} \right) \\
A_{S_{t+1}} &= A_{S_t} + \left(\frac{dA_S}{dt} = \frac{dP_S}{K^{PA}_{S_t}\, dt}\, I^{PA}_{S\Delta t} + \frac{dS_S}{K^{SA}_{S_t}\, dt}\, I^{SA}_{S\Delta t} + \frac{dT_S}{K^{TA}_{S_t}\, dt}\, I^{TA}_{S\Delta t} \right) \\
T_{S_{t+1}} &= T_{S_t} + \left(\frac{dT_S}{dt} = \frac{dP_S}{K^{PT}_{S_t}\, dt}\, I^{PT}_{S\Delta t} + \frac{dS_S}{K^{ST}_{S_t}\, dt}\, I^{ST}_{S\Delta t} + \frac{dA_S}{K^{AT}_{S_t}\, dt}\, I^{AT}_{S\Delta t} \right)
\end{aligned} \tag{23}$$

où:

dS_S/dt = variation de la structure de l'emploi dans le temps pour le système S.
dP_S/dt = variation de la population dans le temps pour le système S.
dA_S/dt = variation de l'accessibilité dans le temps pour le système S.
dT_S/dt = variation de l'interaction dans le temps pour le système S.
$I_{S\Delta t}^{XY}$ = indice d'impact de l'élément E^X sur l'élément E^Y pour le système S.
$K_{S_t}^{XY}$ = constante de stabilité entre l'élément E^X et l'élément E^Y pour le système S.

Cette équation souligne l'interdépendance de tous les éléments et est sujette aux contraintes des équations 6, 9 et 10. Cependant, le problème principal est de résoudre simultanément l'équation 23. Une approche alternative serait de résoudre seulement une partie de l'équation. Par exemple, une estimation de l'interaction peut être effectuée en connaissant les changements d'accessibilité, de la structure de l'emploi et la population pour le système.

Conclusion

Un espace intra-urbain est un système spatial complexe composé de plusieurs éléments en interrelation. Ces éléments sont l'interaction, l'accessibilité, la structure de l'emploi et la population. L'état du système intra-urbain est l'utilisation fonctionnelle du sol. Le modèle développé reflète ce système complexe avec un ensemble de liens entre les éléments. La structure mathématique du modèle est relativement simple. Chaque système intra-urbain a ses propres constantes de stabilité, indices d'impacts, seuils d'activations et contraintes. Donc, le modèle offre une méthodologie pour représenter plusieurs systèmes intra-urbains. Le seul aspect qui change est la configuration des liens entre les éléments. Le problème majeur est de résoudre simultanément les équations qui reflètent ces liens et de calculer des valeurs pour les indices d'impact. Une solution possible est de développer une procédure qui permettait le modèle de s'auto-configurer. Les réseaux neuronaux (Caudill, 1990; White, 1989) et la théorie des automates (Weisbuch, 1989) offrent des solutions à ce problème spécifique. Le modèle peut même être adapté sans aucun changement structurel à la dynamique du système inter-urbain. Cependant, dans ce cas l'ensemble des liens entre les éléments du modèle devient très complexe puisque le nombre de liens croit de façon exponentielle selon le nombre d'éléments.

Bibliographie

Berechman, J. and K.A. Small (1988) "Research policy and review 25. Modeling land use and transportation: an interpretive review for growth areas", Environment and Planning, Vol. 20, pp. 1285-1309.

Caudill, M. (1990) Neural Network Primer, AI Expert, Miller Freeman Publications, San Francisco, 64 pages.

Coutrot, B. et J-J. Droesbeke (1984) Les méthodes de prévision, Presses Universitaires de France, Que sais-je?, Paris, 127 pages.

Negoita, C.V. and D. Ralescu (1987) Simulation, Knowledge-based Computing, and Fuzzy Statistics, Van Nostrand Reinhold Electrical / Computer Science and Engineering Series, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 158 pages.

Openshaw, S. (1986) "Modelling relevance", Environment and Planning, A, Vol. 18, pp. 143-147.

Openshaw, S. (1989) "Computer modelling in human geography", in Macmillan, B. (ed) Remodelling Geography, Basil Blackwell Ltd., Oxford, pp. 70-88.

Pumain, D., Th. Saint-Julien and L. Sanders (1987) "Application of a dynamic urban model", Geographical Analysis, Vol. 19, No. 2, pp. 152-166.

Pryor, E.G. (1987) "Land use-transport strategy formulation in Hong Kong", Land Use Policy (July), Butterworth & Co Ltd, pp. 257-279.

Richardson, H.W. (1977) The New Urban Economics: and Alternatives, Pion, London, 266 pages.

Webster, F.V., P.H. Bly and N.J. Paulley (eds) (1988) Urban Land-use and Transport Interaction: Policies and

Models: Report of the International Study Group on Land-use/Transport Interaction (ISGLUTI), Gower Publishing Company Limited, Aldeershot, 520 pages.

Wegener, M. (1987) "Transport and Location in Integrated Spatial Models", in Transport Planning in a Changing World, Gower Publishing Company Ltd, pp. 208-225.

Weisbuch, G. (1989) Dynamique des systèmes complexes: une introduction aux réseaux d'automates, InterEditions/Editions du CNRS, Paris, 212 pages.

White, R.W. (1989) "The artificial intelligence of urban dynamics: neural network modeling of urban structure", Papers of the Regional Science Association, Vol. 67, pp. 43-53.

Wilson, A.G. (1981) Catastrophe Theory and Bifurcation: Applications to Urban and Regional Systems, Croom Helm Ltd, London, 331 pages.

Yager, R.R., S. Ovchinnikov, R.M. Yong and H.T. Nguyen (eds) (1987) Fuzzy Sets and Applications: Selected Papers by L.A. Zadeh, Wiley, New York.

Zadeh, L. (1965) "Fuzzy sets", Information and Control, Vol. 8, pp. 338-355.